

**Abschlussbericht****TransNav Verbundprojekt:****3D Multimodales Navigationssystem für Transvaskuläre Interventionen****Teilvorhaben:****Multimodale 3D Visualisierung und Dokumentation kardiologischer Bilddaten**

ZE: Universität Ulm

Förderkennzeichen: 13GW0372E

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2019 – 31.03.2023

**Teil I: Kurzbericht**

Im Rahmen des Projekts sollte an der Verbesserung der Planung und Durchführung von kathetergestützten, transvaskulären Interventionen gearbeitet werden. Aktuelle Systeme in diesem Bereich waren geprägt von hoher Komplexität für medizinische Anwender, was zu längeren Interventionszeiten und erhöhter Strahlenexposition für die Patienten führte. Zudem war die postoperative Auswertung solcher Eingriffe aufgrund fehlender oder unausgereifter Dokumentationsmechanismen problematisch. Im Rahmen dieses TransNav Teilprojekts sollten daher die folgenden Aufgaben bearbeitet werden.

Zum einen sollte ein Demonstrator entwickelt werden, der darauf abzielt, die Kontrastmittelmenge, Strahlenexposition und Interventionsdauer bei kathetergestützten transvaskulären Interventionen zu reduzieren. Der Demonstrator sollte auf verbesserten Registrierungs-, Navigations- und Visualisierungstechniken basieren, die auf entsprechenden Arbeitspunkten beruhen. Diese ermöglichen eine detaillierte Dokumentation der Arbeitsvorgänge.

Darüber hinaus, sollte im Rahmen dieses Teilvorhabens außerdem Visualisierungstechniken entwickelt werden, die die Durchführung solcher Interventionen verbessern und die anschließende Dokumentation sowie Analyse ermöglichen. Die bestehende Inviwo-Visualisierungssoftware sollte dazu erweitert werden, um die benötigten Funktionalitäten zu integrieren.

Da kathetergestützte Interventionen die Kombination verschiedener Bildgebungsmodalitäten erfordern, sollte eine multimodale Visualisierung entwickelt werden. Diese sollte es erlauben, die Visualisierung von MRT- und CT-Daten in einem einheitlichen räumlichen Kontext zu ermöglichen, und diese Visualisierungen um die darzustellenden Arbeitspunkte und Instrumente zu erweitern. Die so entwickelten multimodalen Visualisierungen sollten interaktiv umgesetzt werden, um die Navigation während des Eingriffs zu unterstützen. Klarer visueller Fokus sollte dabei auf die im aktuellen Arbeitsschritt relevanten Entitäten gelegt werden. Um der Herausforderung der Vielzahl an Daten und der notwendigen Präzision zu begegnen, sollten mehrere synchronisierte Ansichten verwendet werden. Diese sollte die Darstellung unterschiedlicher Informationen in separaten Ansichten ermöglichen, um dem medizinischen Bediener alle relevanten Informationen zur Verfügung zu stellen. Schlussendlich sollte ein weiterer Schwerpunkt auf der Entwicklung einer standardisierten Dokumentation liegen, die eine postoperative Analyse der Eingriffe ermöglicht, ohne zusätzliche Anforderungen an den Operateur zu stellen.

Alle diese Aufgaben sollten im Kontext des aktuellen Forschungsstandes im Bereich Multimodaler Visualisierung behandelt werden. Die Multimodale Visualisierung von medizinischen Daten befasst sich mit der Darstellung von Datensätzen aus unterschiedlichen Bildgebungsverfahren wie etwa CT, MRT und US, wobei die Fusion solcher Daten eine Herausforderung darstellt. Verschiedene Verfahren wurden entsprechend entwickelt, um Multimodale Visualisierungen umzusetzen, darunter solche, die Daten im selben Raum oder in verschiedenen Ansichten darstellen. Ein Problem bei solchen Visualisierungen ist die gegenseitige Verdeckung der Daten, insbesondere bei komplexen Strukturen. Um dieses Problem zu lösen, wurden Fokus- und Kontext-Techniken entwickelt, die Teile der Daten ausblenden, um einen besseren Blick auf andere Daten zu ermöglichen. Im Projekt sollten diese aktuellen Verfahren eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Um die Ziele des Teilprojektes somit zu erreichen, wurden im Projektverlauf verschiedene technologische Entwicklungen auf Basis des aktuellen Stands der Forschung gemacht, und in die Inviwo Visualisierungs-Software ([www.inviwo.org](http://www.inviwo.org)) integriert. So wurden im Verlauf des Projekts zunächst Koordinatensysteme definiert und übernommen, um die Kompatibilität mit dem bestehenden Softwaresystem des Universitätsklinikums Ulm sicherzustellen. Dies umfasste die Live-Aktualisierung von Röntgenbildern und die Auslesung von Parametern mithilfe der OpenCV-Bibliothek. Erste Visualisierungen wurden entwickelt, darunter volumetrische Darstellungen von CT- oder MRT-Volumen und segmentierte Organe, Knochen und Gefäße in Form von Meshes. Zum Datenaustausch wurde ein DICOM-Exporter in Inviwo integriert, sodass die extrahierten Parameter und Bilddaten in DICOM-Dateien gespeichert werden konnten. Die Integration der "Mathematical Expression Toolkit Library" ermöglichte es mathematische Ausdrücke in Echtzeit auszuwerten. Außerdem wurden neue illustrative Visualisierungs-Techniken für Gefäßbäume entwickelt und implementiert. Alle diese Komponenten wurden in ein auf Inviwo basierendes Rahmenwerk integriert, und gemeinsam mit multimodalen Visualisierungen gelinkt, um Volumen-Renderings mit Röntgenbildern zu kombinieren. Insgesamt diente die so entstandene Inviwo Anwendung als zentrale Plattform für alle Projektpartner, die ihre Algorithmen integrierten. Auf diese Weise entstand der zu entwickelnde Demonstrator, welcher den geplanten Workflow realisiert. Der Demonstrator ermöglicht somit die effiziente Bearbeitung von medizinischen Fällen, und schafft eine wichtige Grundlage für zukünftige, medizinische Evaluationen dar.

Die Ergebnisse dieses Teilprojektes tragen somit dazu bei, eine Verbesserung von kathetergestützten, transvaskulären Interventionen zu ermöglichen. Die entwickelten Visualisierungstechniken ermöglichen weiterhin eine effektive Navigation und eine einfache Auswertung der Eingriffe. Die umgesetzte Interaktion trägt außerdem dazu bei, alle verfügbaren Daten in Beziehung zu setzen und einen umfassenden Überblick über die relevanten Informationen zur Intervention zu erhalten.

## Teil II: Durchgeführte Arbeiten

### II.1 Projektablauf

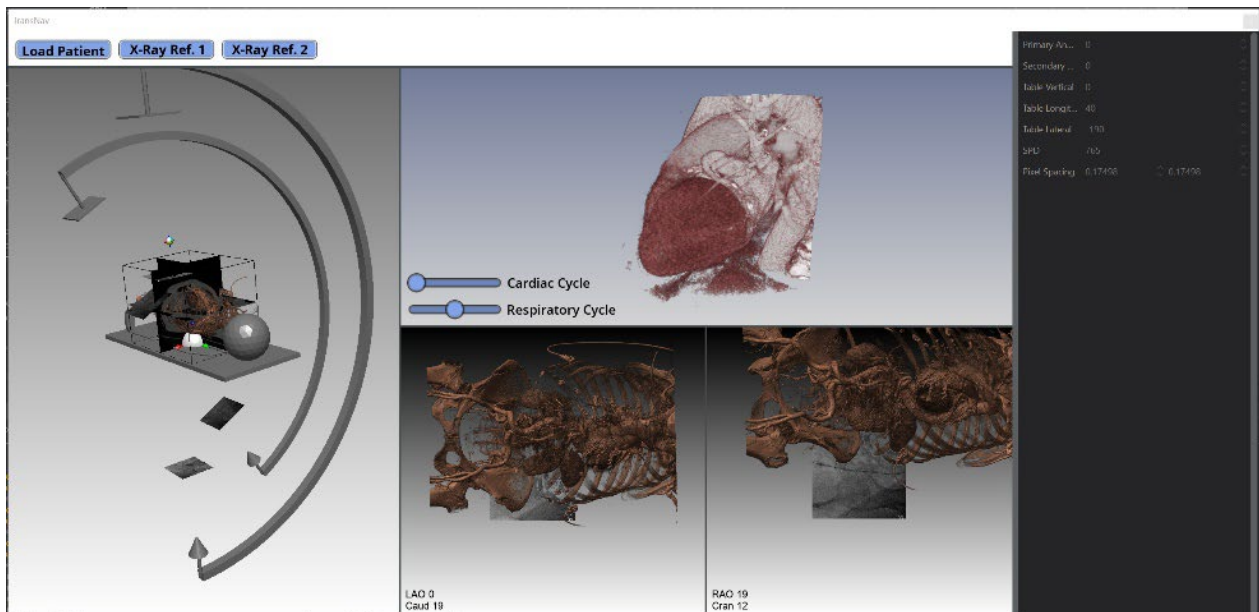
Im Laufe des Forschungsprojekts wurden eine breite Palette wissenschaftlich-technischer Aufgaben erfolgreich bearbeitet, die entscheidend zur Weiterentwicklung der medizinischen Bildgebung und Interventionen beigetragen haben. Die Chronologie des Projektablaufs kann im Detail wie folgt skizziert werden.

Zu Projektbeginn wurde die Festlegung und Übernahme der notwendigen Koordinatensysteme in Angriff genommen, um eine nahtlose Integration in das bestehende Softwaresystem der Universitätsklinik Ulm sicherzustellen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der räumlichen Positionierung von Bildern, Volumendaten und Geometrien im 3D-Raum, wobei die Orientierung maßgeblich am Röntgensystem ausgerichtet wurde. Die Echtzeit-Aktualisierung dieser Informationen erfolgte durch die Aufnahme von Röntgenbildern und die präzise Auslesung relevanter Parameter mithilfe von Texterkennung unter Verwendung der OpenCV-Bibliothek.

Parallel zur Bildanalyse wurden Fortschritte im Bereich der Visualisierung erzielt, implementiert und publiziert. Dieses schließt zum einen die volumetrische Darstellung von CT-Volumendaten mit ein, aber auch die detailreiche Schichtendarstellungen entlang der Hauptachsen (siehe Abb. 1). Zudem wurden Darstellungen segmentierter Organe, Knochen und Gefäße in Form von Geometrien realisiert und fusioniert. Das umfasste nicht nur die Visualisierung der aus dem Röntgensystem übertragenen Bilddaten im 3D-Raum, sondern erstreckte sich auch auf die detaillierte Wiedergabe der medizinischen Geräte wie C-Arme und Untersuchungstische. Obwohl zunächst eine manuelle Registrierung der Röntgenbilder auf das Volumen erforderlich war (siehe Abb. 2), wurde angestrebt, diesen Prozess später automatisch zu gestalten.

Als Basis für alle Entwicklungen, diente die Inviwo Visualisierungs-Software ([www.inviwo.org](http://www.inviwo.org)). Inviwo ist eine vielseitige Open-Source-Visualisierungs-API-Bibliothek, die für Wissenschaftler, Forscher und Entwickler in verschiedenen Bereichen nützlich ist. Mit ihrer modularen Architektur ermöglicht Inviwo die Integration von Visualisierungsfunktionen in bestehende Anwendungen und unterstützt verschiedene Visualisierungsaufgaben, einschließlich 2D- und 3D-Darstellungen, Volumenvisualisierung und Diagrammerstellung. Inviwo zeichnet sich auch durch Echtzeitfähigkeit aus, was sie für Anwendungen mit schneller Interaktion geeignet macht. Die Bibliothek unterstützt die interaktive Datenexploration und kann eine Vielzahl von Dateiformaten verarbeiten. Darüber hinaus bietet Inviwo eine Sammlung von Modulen und Erweiterungen, die von der Entwicklergemeinschaft entwickelt wurden, um die Funktionalität zu erweitern.

Eine grundlegende Weiterentwicklung von Inviwo im Projekt, war die Integration eines einfachen DICOM-Exporters, der es ermöglichte, die extrahierten Parameter und Bilddaten in strukturierten DICOM-Dateien zu speichern. Dieser Export wurde auch in den von Inviwo unterstützten Nodegraph-basierten Ansatz für die Entwicklung von Anwendungen integriert, wobei eine übersichtliche Benutzeroberfläche geschaffen wurde, um Endbenutzern lediglich relevante Informationen anzuzeigen.

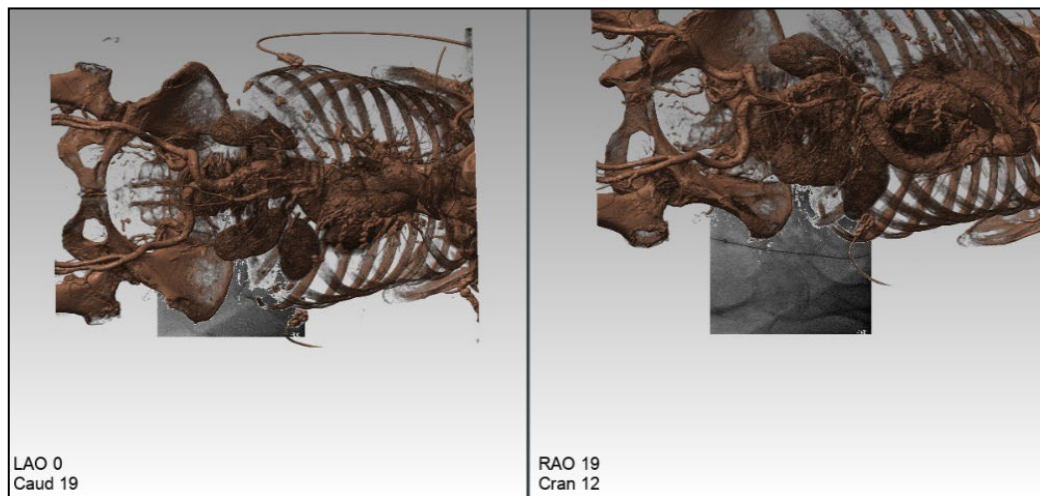


**Abb. 1:** Das mit Inviwo umgesetzte Multi-View-System erlaubt die Integration relevanter Visualisierungen, und sieht bereits das Entlanglaufen entlang der Prozesskette mit Hilfe eines Tabs Systems vor.

In einer späteren Phase des Projekts wurde die "Mathematical Expression Toolkit Library" integriert. Diese ermöglichte die Bereitstellung von mathematischen Ausdrücken in Echtzeit und diente der flexiblen Anpassung der Kameraeinstellungen anhand der Live-Parameter des Röntgensystems. Diese Herangehensweise gestattete eine realitätsgetreue Darstellung der Szene aus Sicht des Arztes, wodurch die Navigation während der medizinischen Eingriffe erheblich optimiert wurde. Zusätzlich wurden entsprechende Visualisierungs-Techniken entwickelt, die die Visualisierung von Gefäßbäumen unterstützten und es ermöglichten, kritische Stellen im Gewebe hervorzuheben, sowie die Navigation der medizinischen Instrumente ohne vollständige Abhängigkeit von Röntgenbildern zu erleichtern.

Ein weiterer Meilenstein war die Entwicklung einer umfassenden multimodalen Visualisierung, bei der Volumen-Renderings der Patientendaten mit sorgfältig segmentierten Teilorganen und Live-Röntgenbildern kombiniert wurden (siehe Abb. 1). Hierbei wurde besonderer Wert auf die präzise Vorverarbeitung der Röntgenbilder gelegt, um exakte Positionsinformationen zu extrahieren. Eine invertierte, konvergierende Kameraprojektion ermöglichte hierbei die Darstellung der Röntgenbilder aus der Perspektive des behandelnden Arztes.

Insgesamt etablierte Inviwo sich als die zentrale Plattform für sämtliche Projektpartner, die über passgenaue Schnittstellen ihre Algorithmen nahtlos integrierten. Der entwickelte Demonstrator unterstützt somit die zentralisierte Bearbeitung medizinischer Fälle, indem er einen effizienten und präzisen Prozess ermöglicht. Auf diese Weise wurde im Projekt eine zuverlässige Grundlage für den Demonstrator für medizinische Untersuchungen und Behandlungen geschaffen.



**Abb. 2:** Eine multimodale CT/MRT Visualisierung ermöglicht die Überprüfung der Registrierung der einzelnen Modalitäten mit live aufgenommenen Röntgenbildern.

Zusammenfassend konnte im Projektverlauf die Bildanalyse, Visualisierung und Integration von medizinischen Daten in einem komplexen multimodalen Umfeld vorangetrieben werden. All diese Entwicklungen tragen somit zur Verbesserung von Interventionen in der medizinischen Bildgebung bei, und bilden die Grundlage für eine etwaige zukünftige Verwertung.

## II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Notwendigkeit für die im zahlenmäßigen Nachweis belegten E13 Personenmonate für die Entwicklungsarbeiten in diesem Teilprojekt, ergibt sich aus der Komplexität und dem Umfang der technischen Aufgaben, die im Rahmen der Implementierung der Visualisierungstechniken und der Erweiterung von Inviwo durchgeführt werden mussten. Die Integration und Anpassung von hochentwickelten Visualisierungstechniken in Inviwo erforderte ein tiefes Verständnis der medizinischen Bildgebung sowie fortgeschrittene Programmierkenntnisse. Somit waren zwei wissenschaftliche Mitarbeiter notwendig, um sicherzustellen, dass die technischen Herausforderungen und Anforderungen angemessen bewältigt wurden. Die Implementierung von Bildanalyse-Algorithmen, die Anpassung von Kameraeinstellungen an Echtzeitdaten des Röntgensystems und die Integration illustrativer Rendering-Techniken erforderten eine sorgfältige Planung und Umsetzung, sowie tiefgehende Kenntnisse in den Bereichen Computergrafik und Visualisierung. Die Bearbeitung von medizinischen Aufgaben, erfolgt darüber hinaus noch die Bereitschaft, sich in den Themenbereich einzuarbeiten. Somit ist eine E13 Besoldung hier nicht nur angemessen, sondern auch notwendig.

## II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Projektarbeiten

Die wissenschaftlich-technischen Aufgaben zielten darauf ab, die medizinische Bildgebung und Interventionen zu verbessern, was angesichts der kritischen Bedeutung dieser Bereiche für die Patientenversorgung von großer Relevanz ist. Die Festlegung und Übernahme der notwendigen Koordinatensysteme, die Live-Aktualisierung von Informationen, die Bildanalyse und Visualisierung von medizinischen Daten sowie die

Integration verschiedener Algorithmen waren unerlässlich, um die Effektivität und Präzision der medizinischen Interventionen zu gewährleisten. Die angestrebte Automatisierung der Registrierung von Röntgenbildern und die Anpassung von Kameraeinstellungen an die Echtzeitdaten des Röntgensystems sind ebenfalls entscheidende Schritte, die zur Realisierung des angestrebten Demonstrators unerlässlich waren.

Die Projektarbeiten waren somit notwendig, um die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts in die Praxis umzusetzen und eine direkte Anwendung in der medizinischen Bildgebung zu ermöglichen. Die Entwicklung und Integration von Visualisierungstechniken, insbesondere im multimodalen Umfeld, schafft dabei einen Mehrwert für Ärzte und medizinisches Fachpersonal, indem sie eine bessere Navigation und detaillierte Informationen während der Eingriffe unterstützen. Angesichts der zunehmenden Bedeutung von bildgebenden Verfahren in der Medizin war es daher unerlässlich, diese Projektarbeiten durchzuführen, um einen positiven Einfluss auf die Gesundheitsversorgung und die medizinische Forschung zu erzielen. In der Zukunft könnte eine Weiterentwicklung des Demonstrators potentiell ebenfalls zur Verbesserung der Patientenversorgung und der diagnostischen Genauigkeit beitragen.

#### **II.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses**

Als universitäre Forschungseinrichtung, haben wir derzeit keine Pläne zur weiteren Verwertung der Ergebnisse dieses Projekts. Unser Hauptfokus liegt auf der Erforschung und Entwicklung von fortgeschrittenen Technologien in der medizinischen Bildgebung und Visualisierung. Allerdings haben unsere industriellen Projektpartner laut Verwertungsvereinbarung die Möglichkeit, die erzielten Ergebnisse zu verwerten und kommerziell zu nutzen. In diesem Falle stehen selbstverständlich gerne zur Unterstützung und Kooperation bereit, um sicherzustellen, dass die entwickelten Technologien effektiv in praktischen Anwendungen genutzt werden können.

#### **II.5 Konkrete Planungen für die nähere Zukunft**

Im Anschluss an das Teilprojekt sind derzeit keine konkreten Pläne für die nähere Zukunft festgelegt. Die Arbeit und Forschung während des Projektverlaufs konzentrierte sich auf die erfolgreiche Durchführung der wissenschaftlich-technischen Aufgaben und die Erstellung eines Demonstrators. Es wurden dabei zwar Fortschritte erzielt, die zur Verbesserung der medizinischen Bildgebung und Interventionen beitragen, die Erstellung einer im klinischen Alltag einsetzbaren Software benötigt allerdings noch mehr Entwicklungsarbeit. Eine solche Weiterentwicklung wird allerdings derzeit nicht in Erwägung gezogen.

#### **II.6 Veröffentlichungen**

Die folgenden Publikationen sind im Projektverlauf entstanden, und dokumentieren somit die Forschungsergebnisse und den wissenschaftlichen Beitrag unseres Teilprojekts in angesehenen Fachzeitschriften oder Konferenzberichten.

- Daniel Jönsson, Peter Steneteg, Erik Sundén, Rickard Englund, Sathish Kottravel, Martin Falk, Anders Ynnerman, Ingrid Hotz, Timo Ropinski  
Inviwo - A Visualization System with Usage Abstraction Levels  
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 2019
- Julian Kreiser, Pedro Hermosilla, Timo Ropinski  
Void Space Surfaces to Convey Depth in Vessel Visualizations  
IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (Proc. of IEEE Visualization and Visual Analytics) 2020
- Daria Kern, Ulrich Klauck, Timo Ropinski, André Mastmeyer  
2D vs. 3D U-Net Abdominal Organ Segmentation in CT Data Using Organ Bounds  
SPIE Medical Imaging Conference 2021
- Michael Stegmaier, Dominik Engel, Jannik Olbrich, Timo Ropinski, Matthias Tichy  
Property-Based Testing for Visualization Development  
EuroVis 2021

### Teil III: Erfolgskontrollbericht

Im Verlauf des Teilprojekts wurden wissenschaftlich-technische Fortschritte gemacht, die sich positiv auf die medizinische Bildgebung und Interventionen auswirken. Wie in Teil II beschrieben, umfassen die Hauptergebnisse die erfolgreiche Implementierung von Bildanalyse- und Visualisierungstechniken in der Inviwo-Softwarebibliothek, wodurch eine effiziente und präzise Integration von medizinischen Daten in einem multimodalen Umfeld ermöglicht wurde. Dies trägt zur Verbesserung von medizinischen Interventionen bei und erweitert die Möglichkeiten in der medizinischen Bildgebung. Die Integration realer medizinischer Daten und Use Cases in die Forschung ermöglichte darüber hinaus die Arbeit an authentischen und relevanten Szenarien. Gleichzeitig wurde so die Förderung von Open-Source-Lösungen vorangetrieben, was die Zugänglichkeit und Transparenz der entwickelten Technologien erhöht. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Forschungsergebnisse. Dies wurde durch umfassende Dokumentation, die Bereitstellung von Quellcode und Konfigurationen sowie den offenen Zugang zu Datenquellen sichergestellt.

Die erzielten Nebenergebnisse umfassen die Entwicklung einer multimodalen CT/MRT-Visualisierung, die die genaue Positionierung von Röntgenbildern und die Darstellung von Patientendaten in Echtzeit ermöglicht. Diese Ergebnisse und Erfahrungen werden den beteiligten Partnern und der medizinischen Gemeinschaft insgesamt zugutekommen.

Basierend auf den erreichten Ergebnissen, wurden im Rahmen des Projekts mehrere Publikationen erstellt und zur Publikation angenommen. Diese Publikationen dokumentieren die erzielten Ergebnisse, und ermöglichen anderen Wissenschaftlern den Zugang zu den erzielten Erkenntnissen. Dabei ist besonders die Tatsache hervorzuheben, dass zwei Artikel in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG) publiziert wurden, welches das weltweit renommierteste Journal in diesem Bereich ist.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass trotz intensiver Arbeiten nicht alle Aspekte zu einer Lösung geführt haben. Einige Aspekte bleiben daher ungelöst, da die Integration neuer Technologien in bestehende medizinische Systeme oft eine erhebliche Herausforderung darstellt. Dies liegt unter anderem daran, dass viele etablierte medizinische Systeme in komplexen, regulierten Umgebungen betrieben werden, in denen strenge Vorschriften für Datensicherheit und Datenschutz gelten. Das Hinzufügen oder Modifizieren von Komponenten kann das Risiko von Sicherheitsverletzungen erhöhen und erfordert daher eine sorgfältige Prüfung und Zertifizierung. Dementsprechend war es uns nicht möglich, live Daten aus dem existierenden Interventionssystem herauszuziehen, und wir mussten einige Funktionalitäten nachimplementieren. Wie wir in Bezug auf die Registrierung feststellen mussten, ist darüber hinaus die Vielfalt der Datenformate, Schnittstellen und Standards in medizinischen Einrichtungen eine Hürde für den reibungslosen Informationsaustausch.

Eine Verwertung der Forschungsergebnisse war im Rahmen dieses Teilprojekts über die geplanten Publikationen hinaus nicht vorgesehen. Unsere Hauptpriorität lag auf der wissenschaftlichen Forschung und der Erstellung von fundierten Publikationen, ohne konkrete Pläne zur kommerziellen oder technologischen Verwertung der Ergebnisse. Aus





diesem Grund liegen im Teilprojekt keine Fortschritte oder Entwicklungen im Bereich der kommerziellen Verwertung vor.

Aufgrund der unvorhersehbaren Herausforderungen der Corona-Pandemie hatten wir für das TransNav Projekt eine Verlängerung um ein halbes Jahr erfolgreich beantragt, um sicherzustellen, dass wir die gesteckten Ziele erreichen konnten. Abgesehen von dieser zeitlichen Anpassung lagen wir ansonsten im Zeitplan und konnten die geplanten Schritte und Meilensteine erfolgreich umsetzen.